

2. Вальгер С.А. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent / С.А. Вальгер, А.В. Федоров, Н.Н. Федорова // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. № 5. С. 27-40.
3. Лазарева Г.Г. Современные численные методы гравитационной газовой динамики // Вестник НГУ. Серия: математика, механика, информатика. 2010. Т. 10, № 1. С. 40-64.
4. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method, – J. Amer. Statistical assoc. 1949. Vol 44. № 247. Pp. 335-341.
5. Kroese D.P., Brereton T., Taimre T., Botev Z. I. Why the Monte Carlo method is so important today. WIREs Comput Stat 6, 2014. Pp. 386-392.
6. Dunn W.L., Shultis J.K. Exploring Monte Carlo Methods. Elsevier, 2011. – 398 p.
7. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I. Handbook of Monte Carlo Methods. Wiley, 2011. 743 p.
8. Лавров В.В. Технология и средства разработки программного обеспечения информационно-моделирующих систем для решения технологических задач доменного производства / В.В. Лавров, Н.А. Спирин, А.А. Бурыкин, А.В. Краснобаев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2012. № 2. С. 147-152.
9. Справочник по ActionScript 3.0 для платформы AdobeFlash. URL: http://help.adobe.com/ru_RU/FlashPlatform/reference/actionscript/3/ (дата обращения: 16.04.2018).
10. Гусев Д.И. Алгоритм поиска ближайших соседей // Программные продукты и системы. 2012. № 3. С. 231-234.
11. Сеченов П.А. Имитационная модель разделения составляющих пыли марганцевого производства / П.А. Сеченов, В.П. Цымбал, А.А. Оленников // Кибернетика и программирование. 2016. № 2. С. 34-41.

УДК 162.2:0043.94

Н. А. Черемискина, Н. Б. Лошкарев, В. В. Лавров, Н. А. Спирин
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ СОВРЕМЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ БАРАБАННОГО ТИПА

Аннотация

В докладе представлена схема и особенности тепловой работы камерной печи барабанного типа для нагрева металлических изделий под закалку. Приведены технические характеристики печи, некоторые результаты теплотехнического расчета. Представлено компьютерное моделирование процессов движения газа и теплообмена в печи. Исследование произведено с использованием САЕ-системы (CAE, Computer Aided Engineering) – программного

модуля *ANSYS Fluent*. В данном модуле были заданы граничные условия течения потоков. Для проверки сходимости расчетов использовался контроль текущих значений и расчетных невязок температуры. Результаты моделирования представлены графически и содержат визуализацию поля распределения температур и скоростей, также представлено векторное распределение скоростей газовых потоков. Полученные результаты компьютерного моделирования позволили оценить эффективность тепловой и газодинамической работы разработанной конструкции камерной печи барабанного типа с постоянной температурой рабочего пространства. Разработанная конструкция печи для нагрева металлических заготовок с перемещением заготовок в печи по барабану позволяет решить некоторые проблемы ресурсо- и энергосбережения [1-6], может быть использована также для термообработки прутков, труб, полосы, и сортового проката различной формы.

Ключевые слова: камерная печь с постоянной температурой рабочего пространства, рекуперативное горелочное устройство, компьютерное моделирование, температурные поля, скоростные поля, ресурсосбережение, горение, теплообмен.

Abstract

The report presents the scheme and features of the thermal operation of a bar-bath type chamber furnace for heating metal products for quenching. The technical characteristics of the furnace, some results of heat engineering calculation are given. A computer simulation of the processes of gas motion and heat transfer in the furnace is presented. The study was carried out using the CAE-system (CAE, Computer Aided Engineering) – program module ANSYS Fluent. In this module boundary conditions of stream flow were established. To check the convergence of the calculations, we used the control of the current values and the calculated temperature discrepancies. The results of the simulation are presented graphically and contain the visualization of the temperature and velocity distribution field, and also the vector distribution of gas flow rates. The results of computer simulation allowed us to estimate the efficiency of thermal and gas-dynamical operation of the designed drum-type chamber furnace with a constant temperature of the working space. The developed design of the furnace for heating metal billets with the transfer of billets in the furnace along the drum allows solving some problems of resource and energy saving [1-6], it can also be used for heat treatment of bars, pipes, strip, and long products of various shapes.

Key words: chamber furnace with constant temperature of working space, recuperative burner device, computer simulation, temperature fields, velocity fields, resource saving, combustion, heat exchange.

Применяемые в наши дни конструкции термических печей имеют значительное количество недостатков. Распространенными способами транспортировки металла в таких печах являются роликовые и конвейерные поды. Нагревательные роликовые печи, устанавливаемые в потоке прокатных станов, имеют большую протяженность, поэтому их сложно размещать в действующих цехах.

Камерная печь барабанного типа для нагрева заготовок перед закалкой разработана учеными ОАО «ВНИИМТ» совместно с кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» Уральского федерального университета.

При реализации предложенной конструкции с транспортировкой проката в термических печах с барабанным механизмом, существенно уменьшающим габариты печи, упрощающим механизмы транспортировки и не имеющим водоохлаждаемых элементов можно ожидать значительного снижения ресурсопотребления. Конструкция обеспечивает постоянство температуры в рабочем пространстве печи за счет выдачи нагретого металла мелкими порциями. Заготовка проходит свой путь в печи за тридцать минут, одновременно осуществляется загрузка новой холодной заготовки, и производится выгрузка нагретой.

Нагрев металлических изделий в камерной печи осуществляется рекуперативными горелочными устройствами типа ГСР–150, работающими следующим образом: газ истекает из сопла в камеру горения, где смешивается с частью воздуха, подогретого в теплообменнике до высокой температуры и сгорает частично в камере сгорания. Остальной воздух подается через кольцевой зазор между соплом камеры сгорания и торцевой стенкой горелки и дожигает топливо в рабочем пространстве печи, смешиваясь с продуктами неполного горения. Продукты сгорания из рабочего пространства удаляются через встроенные в горелки рекуператоры в сборный металлический, теплоизолированный дымопровод.

Схематично конструкция рассматриваемой нагревательной печи под закалку представлена на рисунке 1.

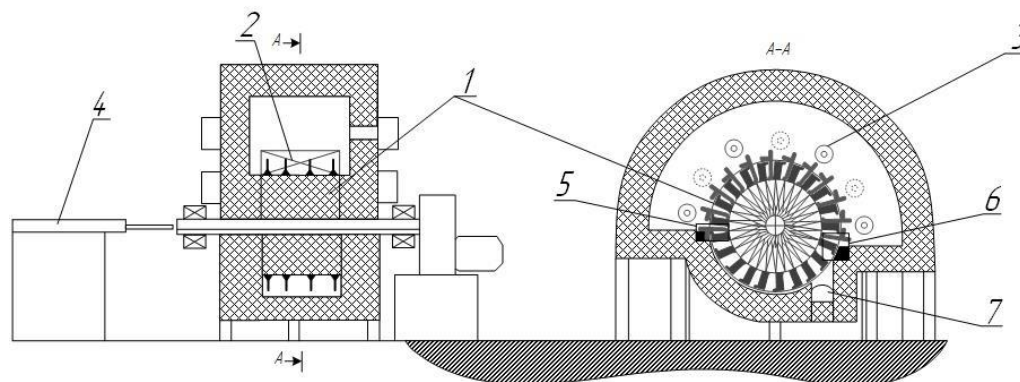


Рис. 1. Схематичная конструкция нагревательной печи:

- 1 – барабан с зубьями; 2 – нагреваемые заготовки;
3 – топливосжигающие устройства; 4 – толкатель; 5 – загрузочное окно;
6 – выгрузочное окно; 7 – окалиносорборник

Вращающийся барабан осуществляет транспортировку проката в процессе нагрева. Барабан изготовлен из жаропрочной стали, выполненной на основе никеля, и способен к долгосрочной работе под напряжением в условиях повышенных температур без заметной остаточной деформации и разрушения.

Теплотехнические расчеты включают в себя расчет горения топлива, нагрева металла, статей теплового баланса и удельного расхода топлива [7-10].

В результате расчета горения природного газа был рассчитан объем продуктов сгорания при $\alpha=1,05$, оказавшийся равным $V_{\alpha}=10,94 \text{ м}^3/\text{м}^3$. В результате расчета нагрева металла определены: масса садки – $G_{\text{м}}=522 \text{ кг}$, удельная производительность печи – $P_{\text{а.п.}}=135,348 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

По i - t диаграммам определены балансовые ($t_0^{\text{б}}$; $t_{\alpha}^{\text{б}}$) температуры горения:

$$t_0^{\text{б}} = 1940^{\circ}\text{C}; t_{\alpha}^{\text{б}} = 2000^{\circ}\text{C}.$$

Температура дымовых газов определена по формуле $t_{\text{г}} = t_{\alpha}^{\text{б}} \cdot \eta_{\text{пир}}$ [7], где $\eta_{\text{пир}}$ – безразмерный пирометрический коэффициент, рекомендуемый для камерных печей, равный 0,58.

$$t_{\text{г}} = 2000 \cdot 0,58 \approx 1160^{\circ}\text{C}.$$

Температура металла на выходе из печи составляет 880°C . Полученная расчетная температура дымовых газов на 280°C превышает конечную температуру

нагретого слитка. Следовательно, предложенный технологический процесс осуществим при выбранном топливе и условиях его сжигания.

Полезное тепловое напряжение поверхности пода $q_{м.п.}$ найдено с учетом приращения теплосодержания металла за время нагрева по формуле

$$q_{м.п.} = r_{п} * \Delta i_{м},$$

где $r_{п}$ – удельная производительность, кг/(м²*ч); $\Delta i_{м}$ – приращение энтальпии материала в интервале температур нагрева от t_0 до $t_{м}$ (τ) с учетом среднего для данного интервала значения удельной теплоемкости материала $c_{м}$. Величина удельной теплоемкости $c_{м}=0,1645$ ккал/(кг·°С) взята из справочника [8] для стали Гадфильда в интервале температур 20–880 °С. В этом случае тепловое напряжение $q_{м.п.}$ составит $q_{м.п.}=33685,67$ Вт/м².

Величина теплового напряжения свободного объема найдена с учетом определения коэффициента полезного действия η печи по формуле

$$\eta = \frac{\Delta i_{м}}{7b},$$

где b – удельный расход условного топлива, (кг у.т*т)/т.

$$\eta = \frac{214}{7*100} = 0,30571.$$

Таким образом, величина теплового напряжения, отнесенная к свободному объему рабочего пространства (без учета горелочных каналов), составит

$$q_{об} = \frac{q_{м.п.}}{\eta * H_{пр}},$$

где $H_{пр}$ – максимальный диаметр факела, м.

$$q_{об} = \frac{28964,47}{0,30571*0,727} = 130321,34 \text{ Вт/м}^3.$$

С учетом величин длины факела ($l_{ф}=3,175$ м) и теплового напряжения печи ($q_{об}=130321,34$ Вт/м³) предложено использовать рекуперативные горелочные устройства ГСР–150.

С помощью CAE-системы (CAE, Computer Aided Engineering) – программного модуля ANSYS Fluent – было произведено моделирование распределения скоростей и температуры газа в рабочем пространстве камерной печи барабанного типа с постоянной температурой рабочего пространства (рисунок 2).

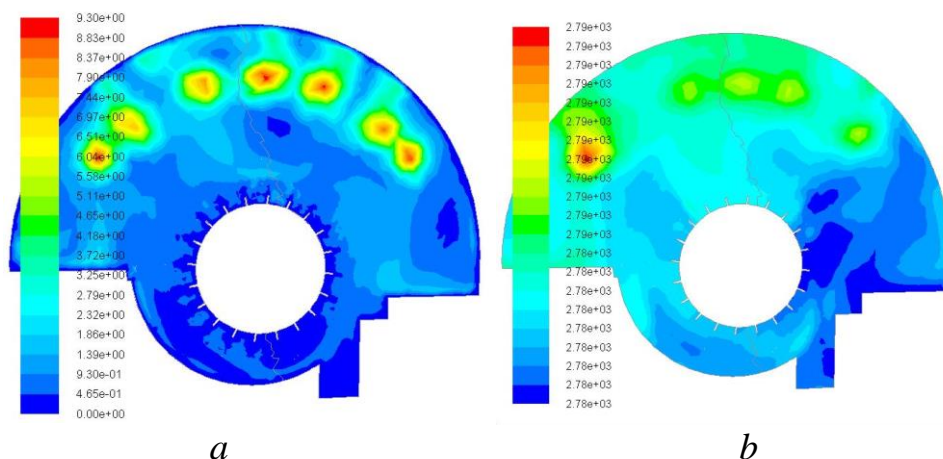


Рис. 2. Распределение температуры (а) и скоростей (b) газообразных продуктов сгорания в рабочем пространстве печи

Проанализировав полученные методом компьютерного моделирования распределения можно сделать вывод об адекватности показателей теплового и газодинамического режимов спроектированной конструкции печи и работы горелочных устройств. На рисунке 3 представлен фрагмент анимированной визуализации векторного распределения скоростных газовых потоков. Векторное распределение скорости газовых потоков в зоне факелов ГРС–150 изображено на рисунке 4. Графики показывают, что максимальная скорость продуктов горения на выходе из сопла составила 61 м/с, а максимальная температура горения 2241 °С. Проведенные исследования будут использованы для последующей наладки схемы отопления в конструкции печи.

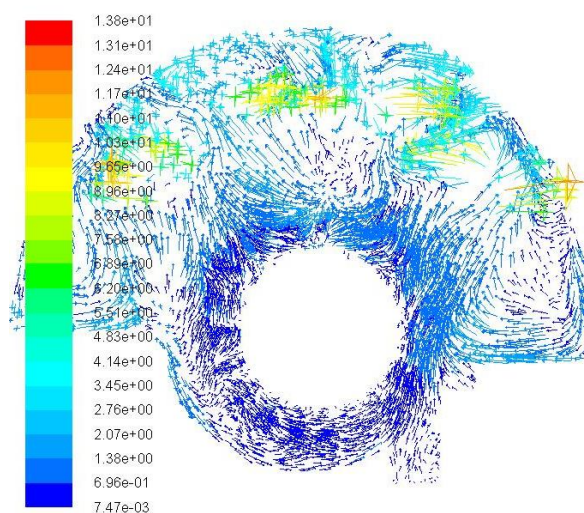


Рис. 3. Векторное распределение скорости потоков газа в рабочем пространстве камерной печи

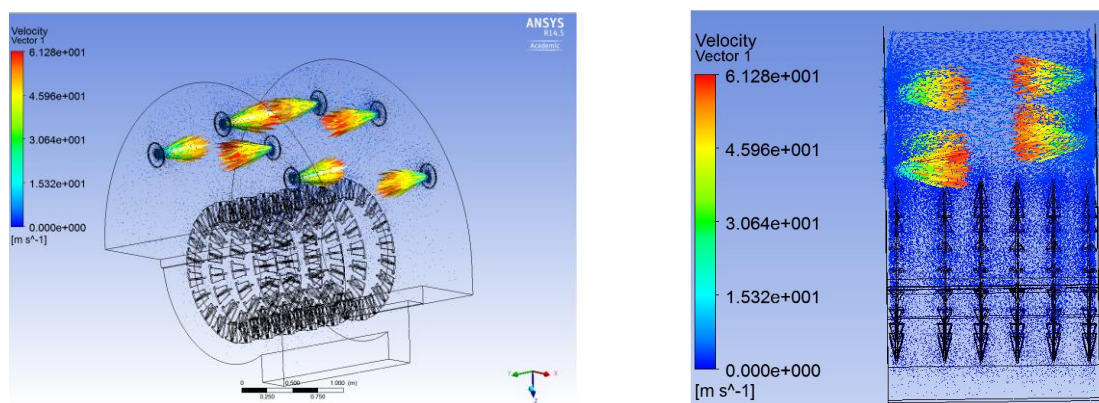


Рис. 4. Векторное распределение скорости газовых потоков в зоне факелов ГРС–150

Таким образом, в результате работы выполнены теплотехнические расчеты камерной печи барабанного типа применительно к созданной проектной конструкции. Полученные результаты компьютерного моделирования позволили оценить эффективность тепловой и газодинамической работы разработанной

конструкции камерной печи барабанного типа с постоянной температурой рабочего пространства. Разработанная конструкция и способ транспортировки изделий в рабочем пространстве печи могут быть использованы также для термообработки прутков, труб, полосы, и сортового проката различной формы.

Список использованных источников

1. Vasserman A.A., Shutenko M.A. Methods of increasing thermal efficiency of steam and gas turbine plants // *Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Problems of Thermal Physics and Power Engineering*. 2017. Vol. 891. Iss. 1. 10 November 2017. Code 012248.
2. Giovannoni V., Sharma R.N., Raine R.R. Thermal Performances of a Small-Scale Regenerative Combustion Chamber for Ultra-Micro Gas Turbine // *Combustion Science and Technology*. 2017. Vol. 189. Iss. 11. 2 November 2017. Pp. 1859-1877.
3. Sai Varun V., Tejesh P., Prashanth B.N. Design and development of tilting rotary furnace // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 310. Iss. 1. 3 March 2018. Code 012084.
4. Jabari F., Mohammadi-ivatloo B., Bannae Sharifian M.B., Nojavan S. Design and robust optimization of a novel industrial continuous heat treatment furnace // *Faculty of Electrical and Computer Engineering. University of Tabriz. Tabriz. Iran. Energy*. 2018. Vol. 142. 1 January 2018. Pp. 896-910.
5. Volkov E.P., Prokhorov V.B., Arkhipov A.M., Kirichkov V.S., Kaverin A.A. Furnace devices aerodynamics optimization for fuel combustion efficiency improvement and nitrogen oxide emission reduction // *Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Problems of Thermal Physics and Power Engineering*. 2017. Vol. 891. Iss. 1. 10 November 2017. Code 012220.
6. Matyukhin V.I., Yaroshenko Y.G., Matyukhina A.V., Dudko V.A., Punenkov S. E. Natural-gas heating of cupola furnaces for more energy-efficient iron production // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. Iss. 8. 1 August 2017. Pp. 528-533.
7. Зобнин Б.Ф., Казяев М.Д., Китаев Б.И. Теплотехнические расчеты металлургических печей. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
8. Советкин В.Л., Федяева Л.А. Теплофизические свойства веществ: учебное пособие. – Свердловск: УПИ, 1990. – 101 с.
9. Гущин С.Н., Зайнуллин Л.А., Казяев М.Д., Юрьев Б.П., Ярошенко Ю.Г. Топливо и расчеты его горения учебное пособие / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. – 105 с.
10. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчета и проектирования. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.